

УДК 621.313

ПРИНЦИП ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОГО АНАЛИЗА
ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ЭДС В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ

В.И.Милых, профессор, д-р техн. наук, Н.В.Полякова, ассистент
(НТУ «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина,
e-mail mvikpi@kpi.kharkov.ua, тел. +380577076514)

На основе численных расчетов вращающихся магнитных полей турбогенератора и использования мгновенных значений магнитного потокоцепления определены временные функции ЭДС его трехфазной обмотки и проведен гармонический анализ этих ЭДС в различных расчетных режимах. Турбогенератор, магнитное поле, численные расчеты, магнитное потокоцепление, ЭДС, гармонический анализ

PRINCIPLE OF THE NUMERAL-FIELD ANALYSIS OF HARMONIC
ANALYSIS COMPOSITION EMF IN A TURBOGENERATOR

V.I. Milykh, Dr. of Sci., Prof., N.V. Polyakova, Assistant
NTU «Kharkov Polytechnical Institute», Kharkov, Ukraine,
E-mail mvikpi@kpi.kharkov.ua, tel. +380577076514)

Numerical computations of rotating magnetic fields of a turbogenerator are applied to evaluating time functions of the turbogenerator three-phase winding EMF using instantaneous magnetic linkage values, harmonic analysis of these EMF accomplished in various rated conditions.

Turbogenerator, magnetic field, numeral calculations, magnetic linkage, EMF, harmonic analysis

Введение. В классической теории электрических машин (ЭМ) переменного тока [1, 2] гармонический анализ ЭДС в трехфазной обмотке выполняется на основе использования ступенчатой координатной кривой магнитодвижущей силы (МДС), а также на основе в соответствующего разложения координатной функции магнитной индукции в зазоре. При та-

ком подходе, да еще и в сочетании с условным аналитическим определением этих функций, приходится игнорировать ряд параметров ЭМ, непосредственно влияющих на гармонический состав ЭДС (реальная структура и насыщение магнитопровода, зубчатость сердечников и их взаимное перемещение, совместное рассмотрение полей статора и ротора). В итоге выявляется только принципиальная суть наличия гармонического состава ЭДС, но надеяться на реалистичные значения его составляющих не приходится ввиду целого ряда условностей и серьезных допущений.

Постановка задачи и объект исследования. Целью данной работы является представление численно-полевого принципа гармонического анализа временных функций ЭДС в трехфазной обмотке статора на примере крупного турбогенератора (ТГ). Суть принципа, обеспечивающая наиболее детерминированный и адекватный гармонический анализ, заключается в использовании временных функций магнитного потокосцепления (МПС), получаемых на основе численных расчетов синхронно вращающихся магнитных полей статора и ротора.

В качестве демонстрационной модели избран ТГ мощностью порядка 225 МВт. Поперечное сечение его электромагнитной системы представлено на рис.1. Здесь $A-A'$, $B-B'$ и $C-C'$ – фазные зоны обмотки статора (первая выделена затемнением); Ω – угловая скорость вращения ротора и магнитных полей; r, α – принятая полярная система координат; d, q – продольная и поперечная оси ротора.

Основные параметры ТГ составляют: число пар полюсов $p=1$; число фаз $m_s=3$; диаметр ротора $d_r = 1,075$ м, немагнитный зазор – 0,1 м; обмотка статора имеет две параллельных ветви $a = 2$; число последовательных витков в фазной обмотке статора $N_s = 10$; расчетная длина – $l_a=5,1$ м; номинальные фазные напряжение $U_{sN}=9093$ В и ток $I_{sN}=9703$ А; $\cos\varphi_{sN} = 0,85$; частота $f=50$ Гц; относительное укорочение шага обмотки статора – 4/5.

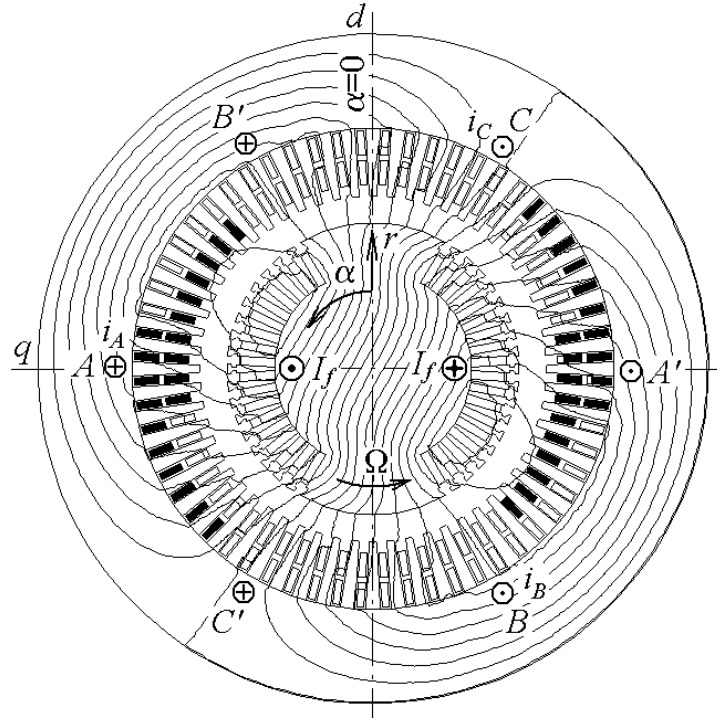


Рис. 1. Расчетная модель турбогенератора

Общий принцип решения задачи. Магнитное поле в поперечном сечении ТГ описывается известным дифференциальным уравнением для аксиальной составляющей векторного магнитного потенциала A_z [3]. Расчет поля проводится методом конечных элементов с использованием общедоступной программы FEMM [4], в результате чего в дискретной форме получается координатное распределение $A_z(r, \alpha)$. При этом имеет место условие полупериодичности поля по координате α :

$$A_z(r, \alpha + \pi) = -A_z(r, \alpha). \quad (1)$$

При гармоническом анализе ТГ базовой величиной является МПС [3, 5-7]. В частности, например, МПС фазной обмотки $A-A'$ (рис.1)

$$\Psi_A = N_s l_a \left(\frac{1}{S_A} \sum_{j=1}^{K_A} A_{z,av,j} \Delta S_j - \frac{1}{S_{A'}} \sum_{j=1}^{K_{A'}} A_{z,av,j} \Delta S_j \right), \quad (2)$$

$S_A, S_{A'}$ – площади сечения по всем токонесящим элементам фазных зон A и A' (затемнены на рис.1); $K_A, K_{A'}$ – числа конечных элементов их дискретизации; $A_{z,av,j}$ – среднее значение ВМП в j -том элементе площадью ΔS_j .

Эффект вращения магнитных полей достигается их многопозиционными расчетами с временным шагом Δt в моменты времени

$$t_k = k \cdot \Delta t; \quad k=0,1,2,\dots,K_{\min}-1, \quad (3)$$

где K_{\min} – минимальное число шагов, которое позволяет сформировать функции МПС и ЭДС на их полном периоде изменения T .

В начальный момент времени $t = 0$ продольная ось ротора d занимает угловое положение $\alpha = 0$ (рис.1), а затем на каждом новом временном шаге (3) ротор, вращаясь с угловой скоростью Ω и сохраняя ток возбуждения I_f , поворачивается на угловой шаг

$$\Delta\alpha = \Omega \Delta t. \quad (4)$$

Синхронное вращение магнитного поля обмотки статора обеспечивалось вычислением фазных токов в определенные моменты времени (3):

$$i_A = I_m \cos(\omega t_k + \beta); \quad i_B = I_m \cos(\omega t_k - \frac{2}{3}\pi + \beta); \quad i_C = I_m \cos(\omega t_k + \frac{2}{3}\pi + \beta), \quad (5)$$

где $I_m = \sqrt{2}I_s$ – амплитуда фазных токов; I_s – их действующее значение; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; β – угловое смещение оси, по которой действует МДС трехфазной обмотки статора, по отношению к оси d ротора.

Принцип определения значений тока возбуждения I_f и угла β для каждого конкретного режима возбуждения ТГ представлен в [5, 6]. Так, для режима холостого хода (ХХ) $I_s = 0$, $\beta = 0$, $I_f = 770,4$ А; для режима номинальной нагрузки (НН) $I_s = I_{sN}$, $\beta = -158,47^\circ$, $I_f = 1994,9$ А. Оба режима согласованы так, чтобы в них была фазная ЭДС $E_s = 9441$ В, получившаяся в номинальном режиме. Поэтому в обоих случаях магнитное поле имело одинаковый уровень и магнитная система примерно одинаково насыщена.

Как показано в [7], для анализа формы ЭДС необходимы временные функции МПС фазных обмоток статора

$$\Psi_{s,k}(t_k); \quad t_k = k \cdot \Delta t; \quad k=0,1,2,\dots,K-1, \quad (6)$$

причем эти функции, с учетом условия (1), во всех режимах достаточно

было сформировать на временном интервале, равном половине периода T .

Мгновенные значения МПС определялись на основе (2) по получаемому каждый раз распределению ВМП $A_z(r, \alpha)$ после расчета магнитных полей для фиксированных моментов времени t_k . Повороты ротора (4), изменение токов статора (5), а также сбор информации (6) проводились при работе программы FEMM автоматически с использованием специально написанной подпрограммы на языке Lua, встроенном в FEMM.

Про каждом очередном расчете генерировалась конечно-элементная структура примерно из 30 тыс. узлов и 59 тыс. треугольников. Был принят угол поворота $\Delta\alpha = 1^\circ$, и на полюсном делении получалось $K=180$ позиций, а реально для формирования дискретной функции (6) достаточно было провести расчеты в $K_{\min}=60$ позициях (3). Эти 60 автоматизированных расчетов поля по программе FEMM на компьютере среднего уровня (2,8 ГГц) длились 43 минуты. Пример картины магнитного поля для режима НН в исходном положении $\alpha = 0$ при $t = 0$ дан на рис.1.

Полученные функции МПС фазных обмоток статора в режиме НН даны на рис.2 на полном периоде. Зрительно они близки к синусоидам, но реальная оценка их формы возможна на основе гармонического анализа.

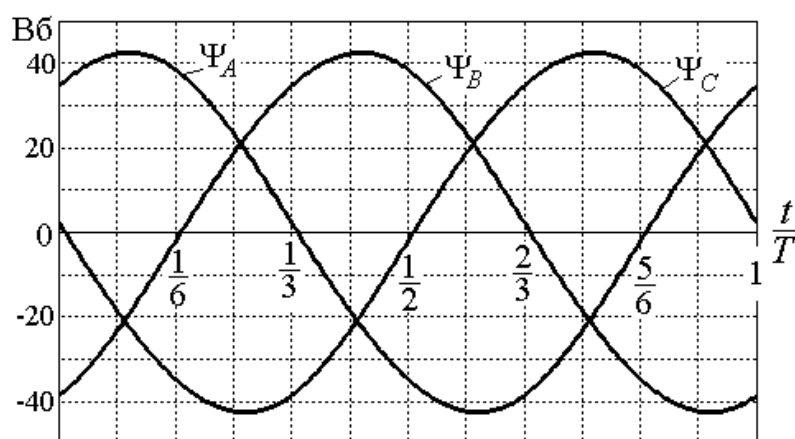


Рис.2. Временные функции МПС трех фазных обмоток

Учитывая уже принятые функции токов (5), временная дискретная функция МПС (6) $\Psi_{s,k}(t_k)$ разлагалась в единый косинусный ряд [8]

$$\Psi = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{N_g} \Psi_{m,v} \cos(v\omega t + \zeta_v), \quad (7)$$

где амплитуды и аргументы (начальные фазы) гармоник

$$\Psi_{m,v} = \sqrt{s_v^2 + c_v^2}; \quad \zeta_v = -\arctg \frac{s_v}{c_v} \quad (8)$$

определяются через коэффициенты частных синусного и косинусного рядов для гармонической составляющей с текущим номером v :

$$s_v = \frac{2}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \Psi_{s,k} \sin v \omega t_k; \quad c_v = \frac{2}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \Psi_{s,k} \cos v \omega t_k. \quad (9)$$

Теперь на основании закона электромагнитной индукции можно через (7) определить гармонический ряд фазной ЭДС

$$e_s = -\frac{d\Psi}{dt} = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{N_g} v \omega \Psi_{m,v} \cos(v \omega t + \zeta_v - \pi/2) \quad (10)$$

и непосредственно амплитуды и действующие значения ее гармоник

$$E_{m,v} = v \omega \Psi_{m,v}; \quad E_v = \frac{1}{\sqrt{2}} v \omega \Psi_{m,v}. \quad (11)$$

Ряды (7) и (10) содержит только нечетные гармоники – ввиду условия (1). Допустимый номер гармоники N_g не может превышать выбранного для (6) числа K (это число интервалов Δt на полупериоде, т.е. на $T/2$).

Результаты расчетов. Расчетный анализ (от магнитного поля и до гармонического состава ЭДС фазных обмоток статора) проведен для упомянутых уже режимов ХХ и НН.

Результаты разложения функций фазных ЭДС по выражениям (7), (8) и (11), представлены в табл.1 и табл.2. В табл.1 даются относительные значения амплитуд наиболее весомых гармоник – начал рядов МПС и ЭДС

$$\Psi_{m,v}^* = \Psi_{m,v} / \Psi_{m,1}, \quad E_{m,v}^* = E_{m,v} / E_{m,1}, \quad (12)$$

где за базу приняты амплитуды первых гармоник $\Psi_{m,1}$ и $E_{m,1}$.

Дополнительно отметим, что еще наиболее заметные амплитуды

ЭДС в режиме ХХ составляли $E_{m,v}^*=0,0011...0,0027$ для гармоник с номерами $v=59, 125, 127, 143, 145, 161, 163, 167, 169, 179$; для режима НН $E_{m,v}^*=0,0012...0,0064$ для гармоник $v=23, 25, 29, 31, 41, 43, 59, 61, 67, 73, 77, 91, 101, 113, 119, 131, 133, 137, 139, 161, 163, 167, 173, 175, 179$.

Таблица 1 – Относительные значения амплитуд гармоник

Режим	v	3	5	7	9	11	13
ХХ	$\Psi_{m,v}^*$	0,0071	0,0001	0,0003	0,0004	0,0000	0,0000
	$E_{m,v}^*$	0,0212	0,0003	0,0021	0,0032	0,0002	0,0002
НН	$\Psi_{m,v}^*$	0,0136	0,0010	0,0006	0,0005	0,0002	0,0001
	$E_{m,v}^*$	0,0408	0,0048	0,0044	0,0048	0,0021	0,0019

В табл.2 выделены данные первых гармоник: амплитуда МПС и действующее значение ЭДС, а также начальные фазы из (7), (10).

Таблица 2 – Расчетные параметры для первой гармоники

Режим	$\Psi_{m,1}$, Вб	E_1 , В	ζ_1 , град	$k_{dist,\Psi}$	$k_{dist,E}$
ХХ	42,50	9441	0,01	1,0000	0,9997
НН	42,36	9411	-33,74	0,9999	0,9990

Кроме того, дан коэффициент искажения кривой ЭДС $k_{dist,E} = \frac{E_1}{E_{eff}}$,

где действующее значение полной функции ЭДС $E_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{v=1,3,5}^{Ng} E_{m,v}^2}$.

Аналогично вычисляется и коэффициент искажения кривой МПС $k_{dist,\Psi}$. Очевидно, что эти коэффициенты достаточно близки к единице, что в целом свидетельствует о достаточно хорошей форме кривых МПС и ЭДС.

На рис.3 построены временные функции МПС Ψ_A и ЭДС e_A по результатам разложения (7) и (10) для фазной обмотки A . Кроме того, для ЭДС более тонкой линией построены синусоиды первой гармоники для

двух режимов. Для режима ХХ график результирующей кривой (10) с учетом гармоник вплоть до высшего номера $N_g=179$ почти сливается с графиком первой гармоники, что соответствует относительно низкому уровню высших гармоник (табл.1). Для режима НН отличия на рис.3 более существенны: здесь результирующая кривая несколько «заваливается» вправо по отношению к кривой 1-ой гармоники: и действительно, в табл.1 видны увеличенные значения амплитуд высших гармоник.

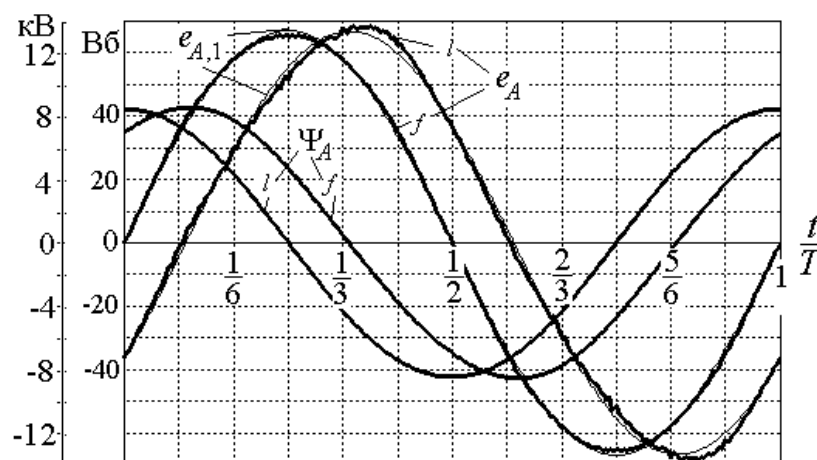


Рис.3. Временные функции МПС и ЭДС
фазной обмотки в режимах ХХ (f) и НН (l)

В кривых e_A , и особенно в режиме НН, на рис.3 заметны некоторые «шероховатости» – пульсации из-за высших гармоник. Но они не носят чрезмерно губительного характера, что уже подтверждено показанными в табл.2 значениями коэффициентов искажения.

Выводы. 1. Представленный метод гармонического анализа ЭДС в обмотке статора ТГ является наиболее детерминированным, так как основан на использовании временных функций магнитных потокоцеплений, формируемых посредством численных расчетов магнитного поля в процессе его вращения. Существенным является уход от традиционного рассмотрения магнитных полей в зазоре и условно выделяемых полей рассеяния. Этот метод практически лишен целого ряда условностей и допущений.

ний, принятых в классической теории ЭМ, которая объясняет существование спектра гармоник, но не дает для них реалистичных значений.

2. В рассмотренном примере ТГ в функциях фазных ЭДС присутствует весьма широкий спектр гармоник с относительными значениями на уровне $0,001 \dots 0,04$ от амплитуды первой гармоники, причем выделяется третья гармоника. В режиме номинальной нагрузки по сравнению с режимом холостого хода высшие гармоники оказываются более выраженными и результирующая временная функция ЭДС отличается от синусоиды. Однако в обоих режимах влияние высших гармоник находится на допустимом уровне и не слишком искажает временные функции ЭДС.

3. Так как предложенная методика учитывает практически все (влияющие на гармонический состав ЭДС) факторы, то она может явиться основой для совершенствования параметров обмоток и магнитной системы ТГ и других электрических машин, обеспечивающих требуемую форму функций ЭДС в их обмотках.

Список литературы

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.— 832 с.
2. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч.2— Машины переменного тока. Л.: Энергия, 1973.—648 с.
3. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Електротехніка і електромеханіка.—2006.—№2.—С.40-46.
4. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>.
5. Милых, В.И., Полякова Н.В. Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе // Електротехніка і електромеханіка.—2011.—№5.—С.33-38.

6. Милых, В.И., Полякова Н.В. Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров // Електротехніка і електромеханіка.— 2012.—№1.—С. - .

7. Милых В.И., Полякова Н.В. Гармонический анализ ЭДС в турбогенераторе на основе численных расчетов вращающихся магнитных полей в различных режимах // Електротехніка і електромеханіка.— 2004.— №4.— С.46-51.

8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973.— 832 с.